

Оценка влияния состава сплава на параметры обработки и качество поверхности посредством комплексного анализа

Шайлеш Рао Азари*¹, кандидат наук, профессор, факультет машиностроения
Рао Шрилата², кандидат наук, профессор

Технологический институт Нимт Минкии, Бангалор (Индия)

*E-mail: shailesh.rao@nmit.ac.in

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6190-9857>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3691-8713>

Поступила в редакцию 25.04.2024

Пересмотрена 18.06.2024

Принята к публикации 05.11.2024

Аннотация: Изучалось влияние состава сплавов (мягкой стали и алюминия) на несколько параметров обработки, таких как температура, сила резания, шероховатость поверхности и морфология стружки. Значительные изменения этих параметров были обнаружены путем модификации сплавов при поддержании постоянных условий процесса. В мягкой стали скорость вращения влияла на морфологию стружки, при этом повышенные скорости приводили к образованию непрерывной стружки, а пониженные скорости – к образованию более короткой стружки. Увеличенный передний угол влияет на свойства стружки, что приводит к небольшому уменьшению ее длины. При заданной скорости вращения на длину стружки влияла сила резания. Алюминиевые сплавы, напротив, производили непрерывные фрагменты стружки независимо от скорости резания или переднего угла. Были выбраны коэффициенты корреляции переменных, разработана эффективная регрессионная модель и применена к экспериментальным данным. Модель случайного леса показывает, что выбор материала существенно влияет на температуру, силу резания, шероховатость поверхности и морфологию стружки во время обработки. Получены данные о корреляции между передним углом инструмента и другими параметрами обработки, выявлены факторы, влияющие на качество поверхности. Результаты способствуют лучшему пониманию свойств обработанной поверхности, что облегчает оптимизацию операций обработки для различных материалов.

Ключевые слова: токарная обработка; передний угол; морфология стружки; прогнозное моделирование.

Для цитирования: Шайлеш Рао А., Рао Ш. Оценка влияния состава сплава на параметры обработки и качество поверхности посредством комплексного анализа // Frontier Materials & Technologies. 2024. № 4. С. 97–110. DOI: 10.18323/2782-4039-2024-4-70-9.

ВВЕДЕНИЕ

Цилиндрические детали изготавливаются по заданным моделям с использованием токарных станков и/или станков с ЧПУ. В ходе процесса стружка отделяется от заготовки из-за сдвигающих усилий, приложенных острым инструментом. Последние достижения в области исследований процесса обработки привели к улучшению качества продукции. Обоснована важность геометрии инструмента в процессе токарной обработки. Значительное количество тепла, выделяемое при удалении стружки с заготовки, приводит к усталости инструмента и ухудшению качества поверхности [1]. Необходимо четко понимать важность геометрии инструмента на протяжении всего процесса обработки. В работе [2] исследовано влияние переднего угла на свойства материала и стружки. Показано, что изменение переднего угла при различных условиях процесса приводило к изменению износа инструмента, морфологии стружки и шероховатости поверхности.

Пластичный материал формирует непрерывную стружку и обеспечивает более длительный срок службы инструмента по сравнению с хрупким материалом, который производит прерывистую стружку и приводит к более короткому сроку службы инструмента [3]. Многочис-

ленные исследования продемонстрировали связь между морфологией инструмента и его долговечностью, а также неровностями его поверхности. Инструменты с большим радиусом, работающие на более высоких скоростях, приводят к меньшей шероховатости поверхности по сравнению с инструментами с меньшим радиусом. В настоящее время для получения обширной информации о параметрах процесса резания применяются аналитические и численные методы [4]. В методологиях моделирования для иллюстрации различных параметров резки и материалов используются двухмерные или трехмерные модели [5]. Многие модели основаны на двухмерной структуре и не реализуются в трех измерениях из-за длительности вычислений и повышенной сложности [6].

Распространение разнообразных коммерческих продуктов возросло из-за быстрого технического прогресса современного общества. В [7] изучены достижения в теоретическом анализе и численном моделировании износа инструмента в мировом масштабе. В работе [8] проведено численное моделирование и имитация процедур резания металла. Для моделирования операций обработки разрабатываются многочисленные численные методы, в т. ч. методы конечных элементов и бессеточные методы [8]. Авторы [9] использовали алгоритм ABAQUS для

моделирования наклонного резания сплавов на основе никеля с использованием инструментов с покрытием, что привело к более точному прогнозированию сил резания. Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными показало, что они совпадают. Инструментарий метода конечных элементов использовался для проведения тщательного анализа влияния ключевых переменных обработки на механические свойства сплавов мягкой стали, обработанных с использованием керамического инструмента. Моделирование генерировало распределенное представление значений температуры и напряжения на режущей кромке инструмента во время анализа [10]. Подходы на основе моделирования или метода конечных элементов используются исключительно для расчета результатов; их нельзя сравнивать с другими факторами процесса или подвергать всестороннему анализу. Для сравнения и прогнозирования выходных переменных с различными предикторами используются различные инструменты, включая MATLAB, ANOVA, а также программное обеспечение с открытым исходным кодом, такое как R и Python. Для установления связи между несколькими независимыми факторами и зависимой переменной для будущих прогнозов применяются регрессионные модели. На основе экспериментальных данных, собранных в процессе обработки, было создано множество численных алгоритмов. Выбор подходящих прогностических моделей облегчает определение оптимальных параметров резания и повышает качество процесса [11; 12]. Разработаны прогностические модели для увеличения долговечности инструмента [13], минимизации продолжительности обработки [14], снижения потребления энергии [15], сокращения времени настройки [16] и пр. Они имеют решающее значение для определения оптимальных параметров резания и повышения качества процедуры. Авторы [17] разработали температурную модель для прогнозирования температуры инструмента во время наклонного вращения, посредством этого объяснив стабильность процесса обработки. В [18] разработана модель для степени истирания во время процесса фрезерования. Важно тщательно изучить влияние передних углов на различные материалы, чтобы создать надежные прогностические модели. Следовательно, необходимы дальнейшие исследования для разработки прогностических моделей, сопоставляющих сталь с алюминием. Форма режущего инструмента является критическим параметром обработки, который влияет на условия резания и, следовательно, на качество готовых изделий¹. Всестороннее понимание того, как свойства материала влияют на механизм резания, требует тщательного изучения морфологии стружки при обработке различных материалов при определенных параметрах процесса.

Исследование направлено на анализ параметров обработки, в т. ч. температуры, силы резания, шероховатости поверхности и морфологии стружки, при различных составах сплавов.

Цель работы – улучшить понимание влияния выбора материала и угла наклона инструмента на качество поверхности, морфологию стружки и другие результаты

обработки, тем самым способствуя оптимизации процессов обработки для различных материалов. Для улучшения результатов необходимо провести прогностический анализ, чтобы понять морфологию поверхности с различными составами материалов.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Токарные работы выполнялись с использованием алюминиевых и стальных сплавов с переменным передним углом в качестве одного из параметров обработки. Выполнялись и количественно оценивались другие возможные комбинации параметров процесса, такие как скорость и сила резания, текстура поверхности и температура. Исследования проводились с использованием сверхмощного прецизионного токарного станка PSG 124 / A 124 производства HMT Machine Tools Ltd. (Hindustan Machine Tools, Индия). В качестве материалов заготовки выбраны два образца – из мягкой стали (EN9) и алюминия (2017-T4), демонстрирующие сопоставимые механические свойства в соответствии со справочниками ASM. Диаметр заготовок составлял 24 мм, длина – 150 мм. Образцы были надежно закреплены в трехкулачковом патроне и вращались со скоростью резания 160 и 360 об/мин, поддерживая постоянную скорость подачи 0,12 мм/об. Использовался инструмент из быстрорежущей стали индийского производства, содержащий 10 % кобальта, с квадратным поперечным сечением 12,7 мм и длиной 50 мм. В качестве параметров процесса взяты передние углы инструмента 3, 5, 8 и 11° и глубина резания 0,5 мм. Для измерения сил, возникающих во время обработки, к токарному станку был прикреплен стандартный динамометр токарного инструмента. Профиль профиля использовался для анализа образования стружки и определения длины зазубрин стружки по увеличенным изображениям. Шероховатость поверхности оценивалась с помощью прибора SJ-218 Talysurf (Mitutoyo, Япония) на обработанной поверхности.

На основе подробных экспериментальных значений предлагается прогностическая модель для обеспечения предварительной оценки взаимосвязи между переменными с фокусом на температуре в качестве выходных данных. Программный инструмент R применялся для создания прогностической модели с использованием экспериментальных данных. Исследование проводилось путем их импорта в среду инструмента. Функция “read.csv()” использовалась для импорта табличных данных с соответствующим форматированием и распределением переменных. Коэффициенты корреляции между зависимыми и независимыми переменными вычислялись сначала из имеющихся данных. Кроме того, для прогнозирования шероховатости поверхности на основе предоставленных данных использовались линейная регрессия и метод случайного леса.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Формирование стружки

Формирование стружки дает представление о качестве заготовки и определяет стабильность обработки. На рис. 1 показаны фотографии стружки на проекторе профиля, что облегчает измерение геометрии стружки.

¹ Dogra M., Sharma V.S., Dureja J.S. Effect of tool geometry variation on finish turning – A Review // *Journal of Engineering Science and Technology Review*. 2011. Vol. 4. № 1. P. 1–13. DOI: [10.25103/jestr.041.01](https://doi.org/10.25103/jestr.041.01).

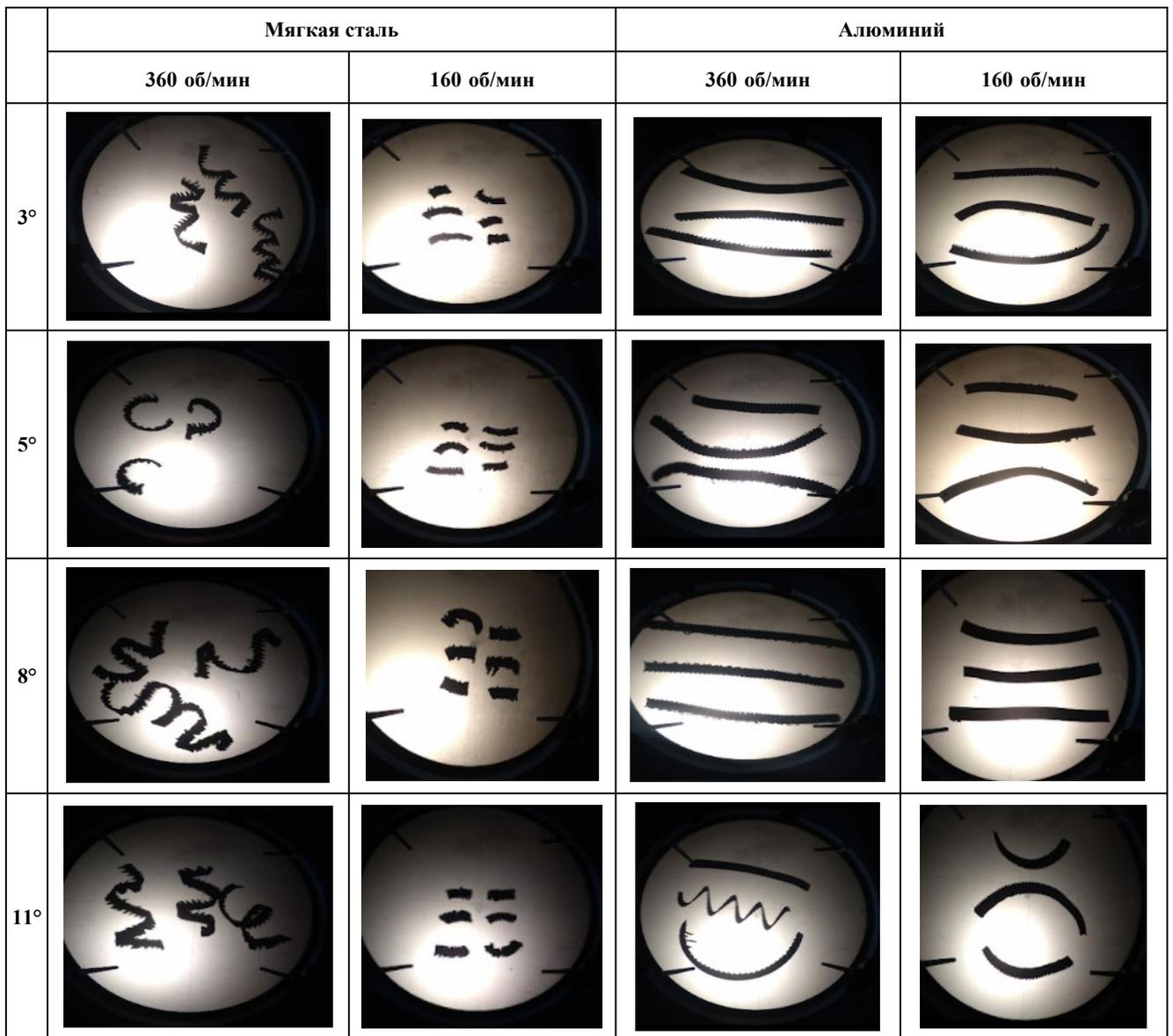


Рис. 1. Образование стружки для различных материалов при различных углах наклона и скоростях вращения
 Fig. 1. Chip formation for the different materials at different rake angles and rotational speeds

Первоначальные наблюдения показывают, что изменение переднего угла повлияли на длину стружки. Это явление возникает из-за изменения направления движения стружки по поверхности лезвия. Примечательно, что при 140 об/мин увеличение силы резания привело к образованию более короткой стружки. Из-за свойств алюминиевых сплавов образование непрерывной стружки происходило независимо от изменений скорости резания или переднего угла, как показано на рис. 1.

Определение свойств в процессе обработки

На рис. 2 а показана высота зубцов, наблюдаемая во время исследования стружки при различных скоростях резания. По мере уменьшения скорости вращения высота увеличивается. При повышенных скоростях вращения образуется непрерывная стружка с завитками. На протяжении всей процедуры режущая кромка инструмента взаимодействует с обрабатываемым материалом, подвергает-

ся сжатию и достигает пластического состояния. При вращении мягкой стали с пониженной скоростью наблюдается большая длина зубцов. В алюминиевых сплавах постоянная толщина съема материала приводит к образованию удлиненного фрагмента с уменьшенной длиной зубцов.

На рис. 2 б представлены значения шероховатости обработанной поверхности. Для мягкой стали эти значения уменьшались с увеличением скорости резания. Как показали результаты, значение шероховатости обратно пропорционально температуре резания. Повышенные температуры резания способствуют термической мягкости материала, что позволяет легко извлекать металл из сплава. Кроме того, увеличение скорости резания усиливает вибрации на уровне поверхности и теплогенерацию. Это приводит к образованию грубой поверхности, что также может быть следствием разрыва стружки между режущей кромкой инструмента и податливой заготовкой. В процессе обработки увеличение переднего угла приводит

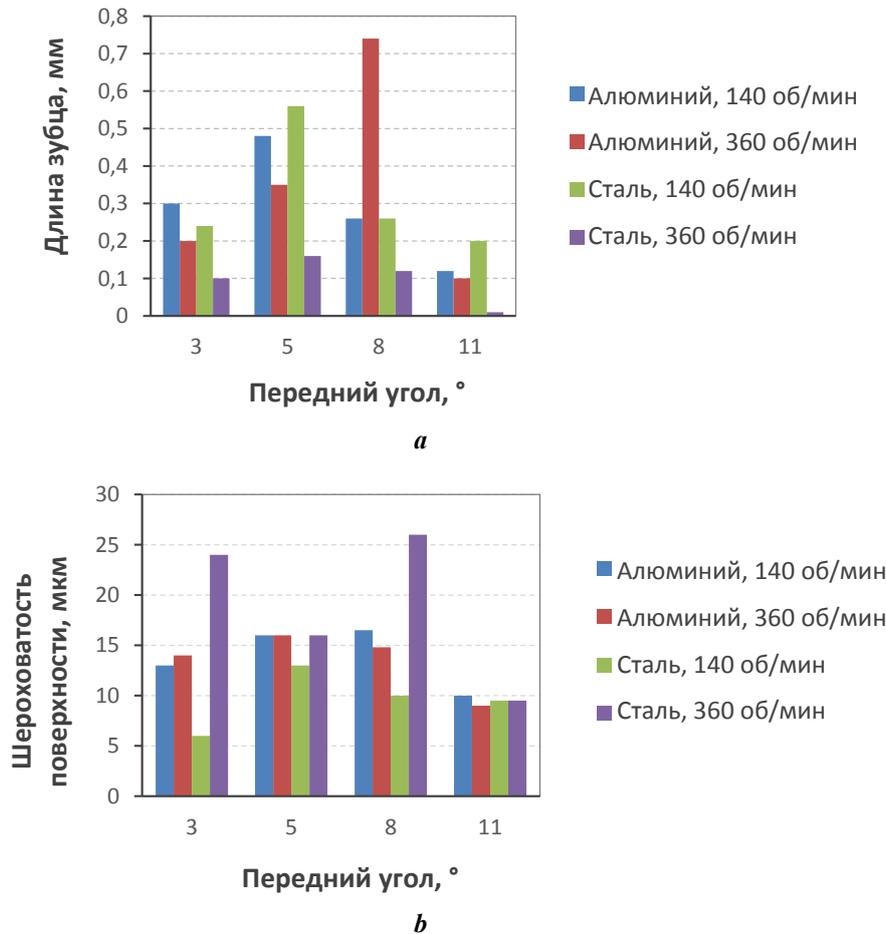


Рис. 2. Определение некоторых механических свойств во время процесса обработки
 Fig. 2. Determination of some mechanical properties during the machining process

к уменьшению силы резания из-за уменьшения контакта на границе режущей кромки инструмента. Как показано на рис. 3 а, длина фрагмента увеличивается до переднего угла 5°, после чего уменьшается. Температура в месте контакта с режущей кромкой инструмента измерялась с помощью пирометра (рис. 3 б). Здесь температура растет с увеличением переднего угла, что может быть следствием более высокой силы трения.

В таблице 1 представлены экспериментальные данные для различных параметров процесса, включая скорость вращения, силу резания, передний угол и шероховатость поверхности, а также соответствующие им выходные переменные.

В таблице 2 показаны значения корреляции, полученные в результате анализа в программном обеспечении R. С помощью этих коэффициентов анализируются связи между различными независимыми переменными и температурой. В данном случае шероховатость поверхности и сила резания имеют сильную положительную корреляцию с температурой. Это подтверждает, что увеличение шероховатости поверхности и силы резания коррелирует с повышением температуры на протяжении всего процесса обработки. Указанные переменные существенно влияют на тепловое поведение процесса. Передний угол демонстрирует умеренную корреляцию с шероховатостью поверхности. Он оказывает минимальное влияние на другие

переменные в исследовании. Среди исследованных параметров самую положительную корреляцию с площадью поверхности и силой резания имела температура. Это указывает на то, что характеристики поверхности и сила резания, возникающая во время обработки, напрямую коррелируют с результирующей температурой. Корреляционный анализ выявил существенные корреляции между этими переменными и зарегистрированной температурой. Кроме того, шероховатость поверхности и сила резания продемонстрировали отрицательную корреляцию с передним углом, как показано в таблице 2.

Множественный регрессионный анализ показал, что сила резания, шероховатость поверхности, передний угол и скорость резания значительно влияют на температуру, возникающую в месте контакта в процессе исследований. В таблицах 3 и 4 приведены значения параметров обработки для алюминия и стали соответственно. Для представленных данных предлагаются следующие модели отклика для алюминия и стали.

Линейная регрессия для стали:

$$T = 199,64 - 0,05Fc - 0,1Ra + 6,482\gamma + 0,077SFM ,$$

где T – температура;

Fc – сила резания;

Ra – шероховатость поверхности;

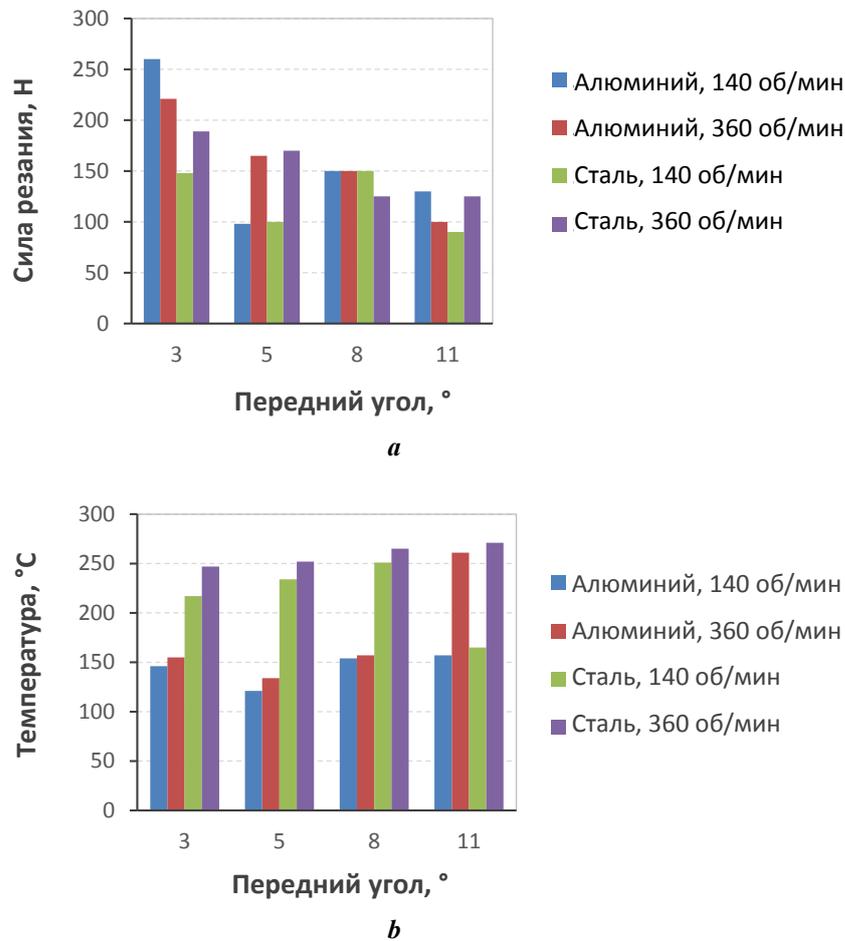


Рис. 3. Распределение температуры для различных передних углов
 Fig. 3. Temperature distribution for various rake angle

γ – передний угол;
 SFM – скорость резания.

Линейная регрессия для алюминия:

$$T = 116,41 - 0,02Fc - 0,05Ra + 2,66\gamma + 0,132SFM .$$

Для повышения производительности обработки важно понимать корреляцию между параметрами процесса и температурой. Экспериментальные результаты подчеркивают температурную чувствительность силы резания, скорости резания, шероховатости поверхности и переднего угла. В обоих уравнениях p -значения для независимых переменных с факторами взаимодействия были ниже 0,05, что означает, что эти переменные оказали статистически значимое положительное влияние на температуру. Использование эффектов взаимодействия указывает на то, что связь между температурой и исследуемыми переменными формируется их взаимодействием, а не является просто аддитивной.

Значения достоверности аппроксимации для обеих моделей составили приблизительно 89 %, что указывает на их обоснованность и хорошее соответствие. Высокие показатели свидетельствуют о том, что модели, основанные на независимых переменных и их взаимодействии, объясняют существенную долю температурных колебаний. Регрессионный анализ температуры дал незначительные остаточные значения, что означает, что разработанные модели

эффективно отображают связь между независимыми переменными и температурой. Минимальные значения остаточных величин предполагают, что модели точно аппроксимируют фактические данные о температуре.

На рис. 4 с помощью программы R показаны фактические и прогнозируемые измерения температуры. Графическое представление показывает, что температурная модель была точнее заявленных параметров процесса. Это подтверждает эффективность разработанных моделей для прогнозирования температуры на протяжении всего процесса обработки.

Функция “plot3d” из пакета “rgl” используется для создания трехмерного графика при программировании в R . Функция “plot3d” используется в работе для иллюстрации корреляции между силой, скоростью резания и температурой для алюминиевых и стальных сплавов, как показано на рис. 5 а. Из рис. 5 а видно, что при различных передних углах сила резания уменьшается с увеличением скорости резания. По мере увеличения скорости резания температура повышается. Из рис. 5 b видно, что температура повышается из-за твердости сплава, что затрудняет его удаление с обрабатываемой поверхности. Кроме того, режущая кромка инструмента прилегает к поверхности заготовки, что повышает температуру. Эффективность процесса обработки в основном зависит от материала заготовки и конфигурации инструмента. Увеличение переднего угла улучшает сцепление между поверхностью материала

Таблица 1. Табличные значения параметров процесса для стали и алюминия
Table 1. Tabulated values of process parameters for steel and aluminium

Материал	Шероховатость поверхности, μm	Сила резания, Н	Передний угол, $^\circ$	Температура, $^\circ\text{C}$	Скорость, об/мин	Высота пика, мм
Алюминий	13	260	3	136	140	0,3
	14	220	3	167	360	0,205
	17	100	5	141	140	0,48
	17	160	5	169	360	0,37
	17,5	150	8	143	140	0,27
	14,5	150	8	174	360	0,75
	10	125	11	151	140	0,13
	6,5	95	11	178	360	0,10
Сталь	7	125	3	221	140	0,24
	24	190	3	243	360	0,12
	13	110	5	234	140	0,58
	17	170	5	253	360	0,17
	11	150	8	252	140	0,20
	27	120	8	257	360	0,13
	7	85	11	263	140	0,185
	7	125	11	289	360	0,015

Таблица 2. Значения корреляции для стали и алюминия при различных параметрах процесса
Table 2. Correlation values for steel and aluminium under different process parameters

	Сталь			Алюминий		
	Шероховатость	Сила резания	Передний угол	Шероховатость	Сила резания	Передний угол
Шероховатость	1	–	–	1	–	–
Сила резания	0,49	1	–	0,19	1	–
Передний угол	–0,34	–0,57	1	–0,58	–0,72	1
Температура	0,63	0,52	0,42	0,42	0,60	0,52
Скорость резания	0,627	0,53	–	0,19	0,48	–

и передней поверхностью инструмента. Это приводит к росту температуры, как показано на рис. 6 а и 6 б. Повышение твердости стального сплава также приводит к повышению температуры.

Рис. 7 иллюстрирует корреляцию между шероховатостью обработанной поверхности, скоростью резания и температурой. По мере увеличения переднего угла неровность поверхности сначала увеличивается, а затем

уменьшается. Наблюдения проводились для обоих сплавов и двух отдельных скоростей резания. Значение шероховатости обработанной поверхности увеличивалось при значении переднего угла от 3 до 5°. Изменение переднего угла для алюминия увеличивало значение шероховатости с 14–15 до 17–18 мкм при обеих скоростях резания. Это в основном связано с установлением более низких температур в месте контакта режущей кромки инструмента.

Таблица 3. Параметры процесса при обработке алюминия и соответствующие им значения
Table 3. The process parameter values during the machining of aluminum and its corresponding values

Шероховатость, μm	Сила резания, Н	Передний угол, $^\circ$	Скорость резания, об/мин	Температура		Остаточная величина
				Фактическая	Значение регрессии	
13	260	3	140	135	137,735	-0,02026
14	220	3	360	168	167,580	0,00250
17	100	5	140	146	146,275	-0,00188
17	160	5	360	172	174,115	-0,01230
17,5	150	8	140	152	153,2575	-0,00827
14,5	150	8	360	182	182,2825	-0,00155
10	125	11	140	162	161,700	0,001852
6,5	95	11	360	190	191,3225	-0,00696

Таблица 4. Параметры процесса при обработке стали и соответствующие им значения
Table 4. The process parameter values during the machining of steel and their corresponding values

Шероховатость, μm	Сила резания, Н	Передний угол, $^\circ$	Скорость резания, об/мин	Температура		Остаточная величина
				Фактическая	Значение регрессии	
7	125	3	140	220	222,916	-0,013250
24	190	3	360	238	234,906	0,013000
13	110	5	140	235	236,030	-0,004380
17	170	5	360	254	249,570	0,017441
11	150	8	140	255	253,676	0,005192
27	120	8	360	268	270,516	-0,009390
7	85	11	140	270	276,772	-0,025080
7	125	11	360	290	291,712	-0,005900

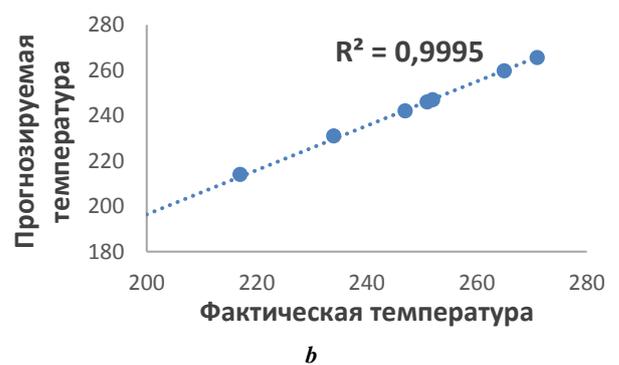
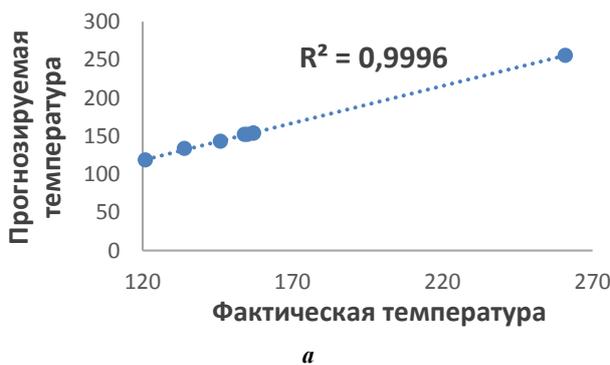


Рис. 4. Сравнение фактического и прогнозируемого значений температуры для алюминия (а) и стали (б)
Fig. 4. Comparison of actual temperature and predicted temperature value for aluminium (a) and steel (b)

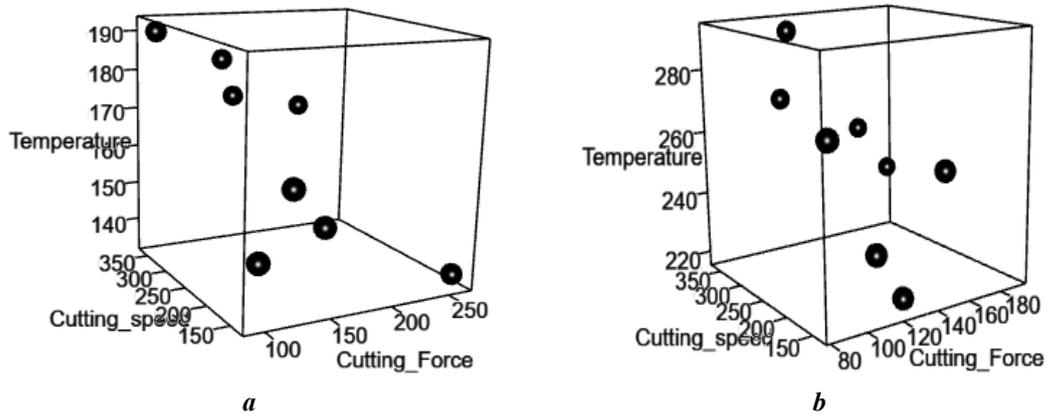


Рис. 5. Изменение силы и скорости резания в зависимости от температуры для алюминия (а) и стали (б)
 Fig. 5. Variation of cutting force and cutting speed with temperature for aluminium (a) and steel (b)

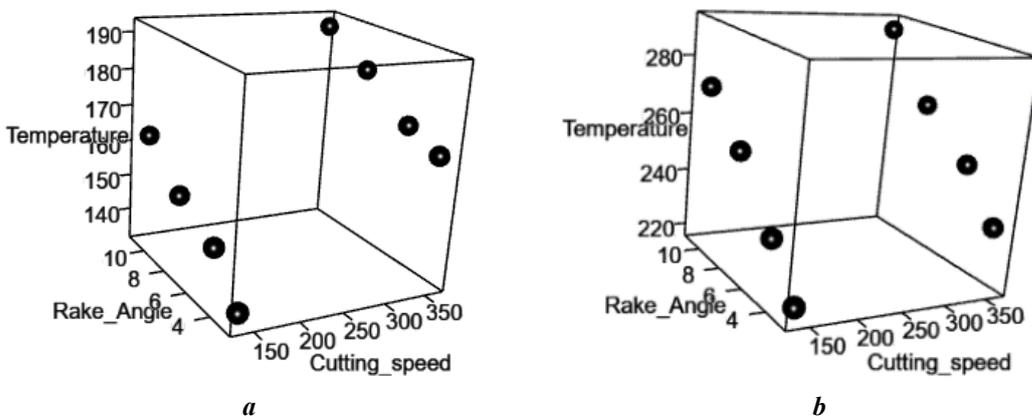


Рис. 6. Изменение переднего угла и скорости резания в зависимости от температуры для алюминия (а) и стали (б)
 Fig. 6. Variation of rake angle and cutting speed with temperature for aluminium (a) and steel (b)

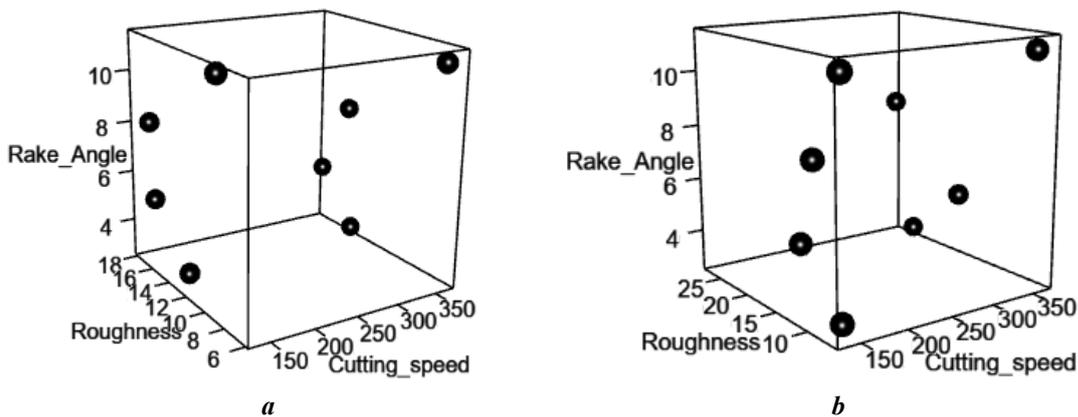


Рис. 7. Изменение шероховатости и скорости резания в зависимости от переднего угла для алюминия (а) и стали (б)
 Fig. 7. Variation of roughness and cutting speed with rake angle for aluminium (a) and steel (b)

Увеличение переднего угла приводит к изменению температуры к центру заготовки из-за ее повышенной теплопроводности. На протяжении всего процесса обработки поверхность становится более гладкой, даже при небольшом повышении температуры. Это умень-

шает шероховатость поверхности, поскольку фрагменты легко удаляются с заготовки. Значение шероховатости уменьшалось по мере увеличения переднего угла до 8 и 11° из-за рассеивания тепла благодаря теплопроводности и размягчению материала.

Сталь, как более прочный материал, требует увеличения силы резания для отделения частиц от заготовки. Шероховатость поверхности увеличивается с увеличением переднего угла, но уменьшается по мере развития нароста на резце или наплавленного слоя на контакте с режущей кромкой инструмента, и материал подвергается размягчению. По сравнению с алюминием сталь демонстрирует более низкую теплопроводность. Рис. 8 а иллюстрирует повышение температуры резания. Шероховатость поверхности увеличивается с увеличением переднего угла и скорости резания.

Метод случайного леса считается одним из наиболее эффективных подходов к классификации в машинном обучении. Он используется для набора данных, включающего несколько параметров процесса обработки двух различных сплавов. Несмотря на очень ограниченный размер набора данных, алгоритм случайного леса эффективно идентифицировал изменения свойств сплава в зависимости от особенностей их обработки. Из набора данных, представленного в таблице 1, 70 % точек данных были выделены для

обучающего набора для облегчения точной оценки модели, в то время как оставшиеся 30 % были предназначены для проверки. Согласованность моделей оценивалась с помощью рис. 8 а, который иллюстрировал их производительность на протяжении увеличенного количества деревьев решений. График показал положительную корреляцию между количеством деревьев и стабильностью модели, что говорит о том, что увеличение количества деревьев повышает надежность результатов классификации. Все числовые результаты должны быть отображены в разделе с тем же названием. Кроме того, рис. 8 b продемонстрировал зависимость переменных от выбора материалов. Примечательно, что при сравнении стали и алюминия длина сегмента стружки показала наиболее существенную (около 55 % от общего числа) степень влияния на выходной параметр. Максимальная высота в основном зависела от прочности и состава материала на протяжении всего процесса токарной обработки. Более того, эти характеристики материала определяли примерно 35 % колебаний температуры во время обработки.

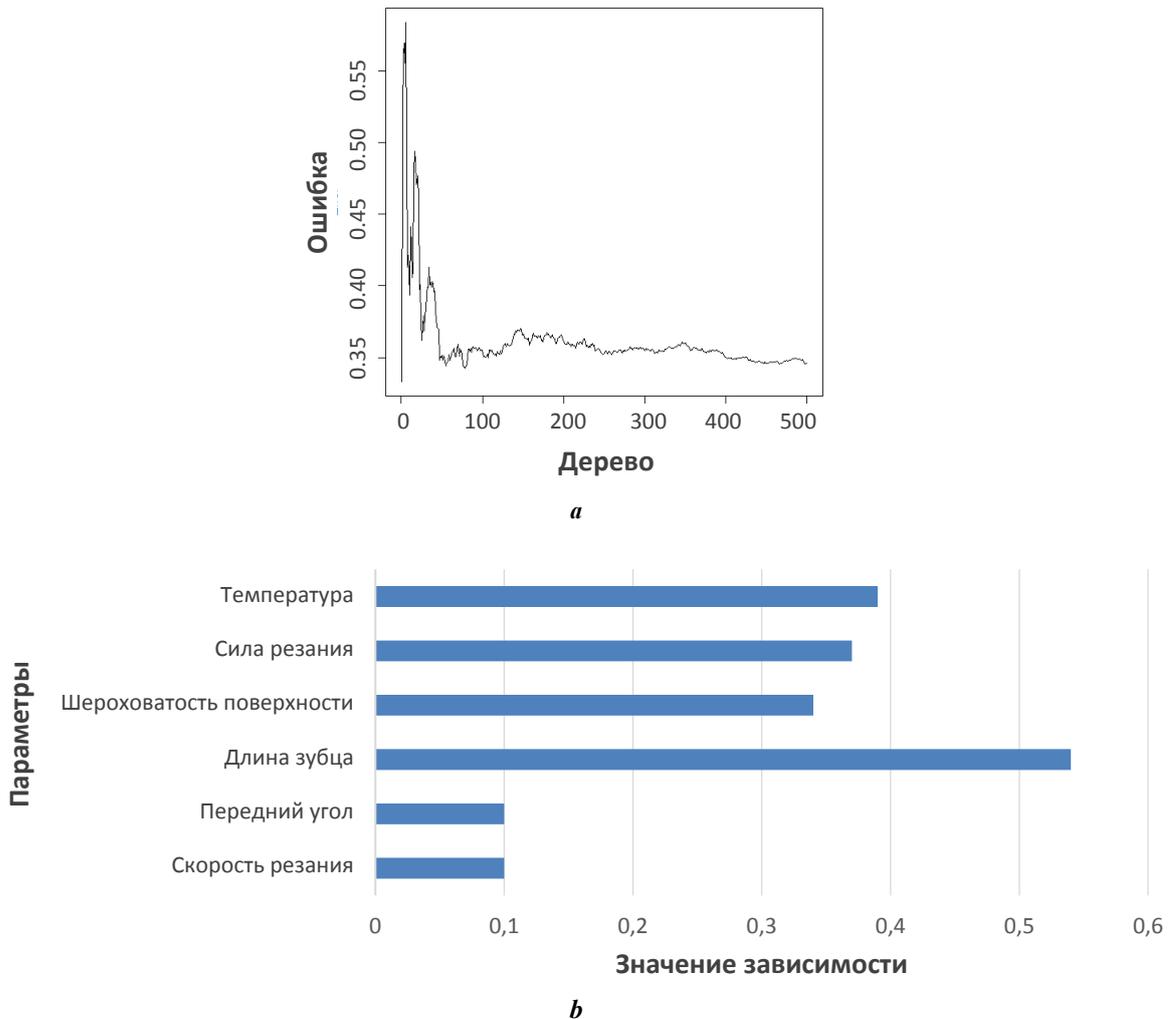


Рис. 8. Значимость параметров модели, полученная для случайного леса, по степени влияния на выходной параметр (а) и график зависимости между переменными для выбора материала в качестве выходных данных (b)

Fig. 8. Error plot during the Random Forest model iteration (a) and dependency plot between the variables for the material selection as output (b)

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Формирование стружки дает представление о качестве заготовки и определяет стабильность обработки. При обработке пластичных материалов образуются непрерывные стружки. Это в основном объясняется пластической деформацией внутри обрабатываемого материала. Неправильные настройки резания приведут к образованию прерывистых стружек при фрезеровании пластичных и хрупких материалов. Значительные заусенцы на стружке образуются во время фрезерования в условиях повышенного трения. Это происходит из-за фрикционного сопротивления и образования наростов в месте расположения режущей кромки инструмента. Исследование показало, что более высокие скорости вращения приводят к образованию непрерывных стружек в мягкой стали, в то время как более низкие скорости дают более короткие стружки [19]. Это явление можно объяснить обратной корреляцией между скоростью резания и сжимающим напряжением, при этом увеличение скорости резания снижает сжимающее напряжение, способствуя образованию непрерывных стружек. Более того, увеличение переднего угла привело к росту высоты зубцов. Это явление объясняется повышенной сегментацией и проблемами при сдвиговом скольжении, что приводит к большему раскалыванию материала на каждом пике.

Изменение переднего угла также повлияло на длину стружки, что привело к небольшому уменьшению стружки мягкой стали. Это является результатом изменения направления схода стружки по поверхности лезвия. Примечательно, что при 140 об/мин увеличение силы резания привело к образованию более короткой стружки. Свойства алюминиевых сплавов привели к образованию непрерывной стружки независимо от изменений скорости резания или переднего угла. Морфологические особенности фрагментов остались в основном неизменными, несмотря на изменения этих параметров.

Высота зубцов анализировалась в зависимости от различных скоростей резания. Показано, что высота увеличивается по мере уменьшения скорости вращения. При повышенных скоростях вращения образуется непрерывная стружка с завитками. На протяжении всей процедуры режущая кромка инструмента сталкивается с обрабатываемым материалом, подвергается сжатию и достигает пластичного состояния. Большая длина зубцов наблюдается при вращении мягкой стали с пониженной скоростью. Это в основном объясняется повышенным напряжением, возникшим на рабочей поверхности. Во время обработки материал проявляет характеристики, сходные с характеристиками хрупкого вещества. Увеличение переднего угла повышает сжимающее напряжение [20]. В алюминиевых сплавах постоянная толщина снятия материала дает удлиненный фрагмент с уменьшенной длиной зубцов.

Для мягкой стали значения шероховатости поверхности обработанной области уменьшались с увеличением скорости резания. Результаты показывают, что ее значение обратно пропорционально температуре резания. Повышенные температуры резания способствуют термической мягкости материала, что позволяет легко извлекать металл из сплава [21]. Термопластичность сплава при повышенных температурах объясняется идеальными значениями энергии трения и энергии плоскости сдвига [22]. Потенциал повышенных температур на режущей кромке инструмента способствует

размягчению обработанной области поверхности. Авторы [23; 24] выяснили, что увеличение скорости резания уменьшает шероховатость поверхности алюминиевых сплавов, что приводит к уменьшению длины зубцов. Более того, увеличение скорости резания усиливает вибрации на уровне поверхности и генерацию тепла. Это приводит к созданию шероховатой поверхности, потенциально вызванной разрывом стружки между кромкой инструмента и гибкой заготовкой. Увеличение небольшого переднего угла уменьшает точку контакта, следовательно, постепенно снижает силу резания [25]. Генерация вибраций может привести к образованию поверхности с неровной текстурой. Увеличение переднего угла до 11° улучшает качество поверхности [26].

В процессе обработки увеличение переднего угла приводит к снижению силы резания из-за уменьшения контакта на поверхности кромки инструмента [27; 28]. На рис. 3 а показано, что длина фрагмента увеличивается до достижения значения 5° для переднего угла, после чего она уменьшается. Температура в месте контакта режущей кромки инструмента измерена с помощью пирометра (рис. 3 б). Здесь температура растет с увеличением переднего угла, что может быть результатом повышенной силы трения.

Из таблицы 2 видно, что шероховатость поверхности и сила резания имеют сильную положительную корреляцию с температурой, т. е. рост шероховатости поверхности и силы резания коррелирует с ростом температуры на протяжении всего процесса обработки. Эти переменные существенно влияют на термическое поведение процесса. Передний угол демонстрирует умеренную корреляцию с шероховатостью поверхности и оказывает минимальное влияние на другие переменные, введенные в данное исследование. Температура имела наиболее положительную корреляцию с площадью поверхности и силой резания среди исследованных параметров. Это указывает на то, что характеристики поверхности и сила резания, возникающая во время обработки, напрямую коррелируют с результирующей температурой. Корреляционный анализ выявил существенные корреляции между этими переменными и зарегистрированной температурой. Кроме того, шероховатость поверхности и сила резания показали отрицательную корреляцию с передним углом.

Сила резания уменьшается по мере увеличения скорости резания при различных передних углах, как показано на рис. 5 а. Здесь уменьшение силы резания обусловлено уменьшением взаимодействия стружки и инструмента. По мере увеличения скорости резания температура увеличивается. В результате предел текучести уменьшается с ростом скорости резания [29]. Высокая теплопроводность и низкая твердость алюминиевых сплавов во время обработки позволили эффективно удалить материал с заготовки. В отличие от стальных сплавов, значительное количество тепла рассеивается по области стружки, что приводит к снижению температуры. Нарост на режущей кромке резака образуется при повышенной скорости резания стали. Как видно из рис. 5 б, при более низкой скорости резания наблюдается повышение температуры из-за твердости сплава, что затрудняет его удаление с рабочей поверхности. Кроме того, режущая кромка инструмента прилегает к поверхности заготовки, повышая температуру.

Эффективность процесса обработки в основном зависит от материала заготовки и конфигурации инструмента.

В целом передний угол существенно влияет на температуру, создаваемую на границе с инструментом. Увеличение силы подачи привело к повышению температуры обоих материалов. Изменение профиля передней поверхности приводит к образованию нароста на режущей кромке и нароста слоя под поверхностью стружки, контактирующей с передней поверхностью. Это приводит к повышению температуры, как показано на рис. 6 а и 6 б. С увеличением скорости резания температура резания снижается. Аналогичные наблюдения сделаны в [30], где было отмечено, что нарост на режущей кромке и нарост слоя уменьшаются с увеличением скорости резания (глубина резания – 0,15 мм).

Рис. 7 иллюстрирует корреляцию между шероховатостью обработанной поверхности, скоростью резания и температурой. Здесь значение обработанной поверхности увеличилось при значении переднего угла от 3 до 5°. Это в основном связано с установлением более низких температур в месте контакта с режущей кромкой инструмента. Увеличение переднего угла приводит к изменению температуры к центру заготовки из-за ее повышенной теплопроводности. На протяжении всего процесса обработки поверхность становится более гладкой, даже при небольшом повышении температуры. Это уменьшает шероховатость поверхности, поскольку фрагменты легко удаляются с заготовки. Значение шероховатости уменьшалось по мере того, как передний угол увеличивался до 8 и 11° из-за потери тепла через теплопроводность и из-за размягчения материалов. Сталь, как более прочный обрабатываемый материал, приводит к увеличению силы резания для отделения частиц от заготовки. Шероховатость поверхности увеличивается с увеличением переднего угла, но уменьшается по мере того, как нарост на кромке или нарост на слое развивается на границе раздела инструмента и режущей кромки и материал подвергается размягчению. По сравнению с алюминием сталь демонстрирует более низкую теплопроводность, здесь в конечном итоге отмечается уменьшение шероховатости поверхности.

ВЫВОДЫ

Передний угол инструмента является одним из важнейших факторов для оценки параметров обработки в процессе токарной обработки. Изменение температуры в месте контакта режущей кромки инструмента можно объяснить изменением переднего угла, что также приводит к изменению шероховатости поверхности. В настоящей работе алюминиевые и стальные сплавы с сопоставимыми характеристиками обрабатываются с использованием установленных для процедуры параметров. В результате исследования сделаны следующие выводы.

1. Во время обработки образца из мягкой стали при большей скорости вращения получена большая длина стружки. Меньшая длина стружки наблюдается при меньшей скорости вращения из-за снижения сжимающего напряжения, возникающего во время обработки. При работе с мягкими алюминиевыми сплавами получены постоянные длинные стружки, несмотря на разницу в скорости вращения.

2. Шероховатость поверхности обоих сплавов увеличивается с ростом скорости резания. Дополнительное трение, возникшее в области контакта режущей кромки инструмента с поверхностью, привело к увеличению шероховатости.

3. Значения корреляции, наблюдаемой между переменными, были определены как удовлетворительные. Построена регрессионная модель, которая была успешно применена к данным испытания.

4. Сила и скорость резания, передний угол и шероховатость поверхности оказывают значительное влияние на температуру, возникающую на границе между инструментом и заготовкой.

5. Для понимания зависимости от переменных для выбранного контента использована модель случайного леса. В процессе обработки установлено, что выбор материала оказывает значительное влияние на температуру, силу резания, шероховатость поверхности и форму получаемой стружки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Anand A., Behera A.K., Das S.R. An overview on economic machining of hardened steels by hard turning and its process variables // *Manufacturing Review*. 2019. Vol. 6. P. 1–9. DOI: [10.1051/mfreview/2019002](https://doi.org/10.1051/mfreview/2019002).
2. Duc Pham Minh, Giang Le Hieu, Dai Mai Duc, Sy Do Tien. An experimental study on the effect of tool geometry on tool wear and surface roughness in hard turning // *Advances in Mechanical Engineering*. 2020. Vol. 12. № 9. P. 1–11. DOI: [10.1177/1687814020959885](https://doi.org/10.1177/1687814020959885).
3. Rao A.S. Effect of nose radius on the chip morphology, cutting force and tool wear during dry turning of Inconel 718 // *Tribology – Materials Surfaces & Interfaces*. 2023. Vol. 17. № 1. P. 62–71. DOI: [10.1080/17515831.2022.2160161](https://doi.org/10.1080/17515831.2022.2160161).
4. Bellini C., Di Cocco V., Iacoviello F., Sorrentino L. Numerical model development to predict the process-induced residual stresses in fibre metal laminates // *Forces in Mechanics*. 2021. Vol. 3. Article number 100017. DOI: [10.1016/j.finmec.2021.100017](https://doi.org/10.1016/j.finmec.2021.100017).
5. Mathivanan A., Swaminathan G., Sivaprakasam P., Suthan R., Jayaseelan V., Nagaraj M. DEFORM 3D Simulations and Taguchi Analysis in Dry Turning of 35CND16 Steel // *Advances in Materials Science and Engineering*. 2022. Vol. 2022. № 1. P. 1–10. DOI: [10.1155/2022/7765343](https://doi.org/10.1155/2022/7765343).
6. Mathivanan A., Sudeshkumar M., Ramadoss R., Ezilarasan C., Raju G., Jayaseelan V. Finite element simulation and regression modeling of machining attributes on turning AISI 304 stainless steel // *Manufacturing Review*. 2021. Vol. 8. Article number 24. DOI: [10.1051/mfreview/2021022](https://doi.org/10.1051/mfreview/2021022).
7. Li Bin. A review of tool wear estimation using theoretical analysis and numerical simulation technologies // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2012. Vol. 35. P. 143–151. DOI: [10.1016/j.ijrmhm.2012.05.006](https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2012.05.006).
8. Outeiro J.K., Umbrello D., M'Saoubi R., Jawahir I.S. Evaluation of Present Numerical models for Predicting Metal Cutting Performance and Residual Stresses // *Machining Science and Technology*. 2015. Vol. 19. № 2. P. 183–216. DOI: [10.1080/10910344.2015.1018537](https://doi.org/10.1080/10910344.2015.1018537).

9. Zheng Jin, Zhang Yaoman, Qiao Hanying. Milling Mechanism and Chattering Stability of Nickel-Based Superalloy Inconel 718 // *Materials*. 2023. Vol. 16. Article number 5748. DOI: [10.3390/ma16175748](https://doi.org/10.3390/ma16175748).
10. Xiang Huimin, Xing Yan, Dai Fu-zhi et al. High-entropy ceramics: Present status, challenges, and a look forward // *Journal of Advanced Ceramics*. 2021. Vol. 10. № 3. P. 385–441. DOI: [10.1007/s40145-021-0477-y](https://doi.org/10.1007/s40145-021-0477-y).
11. Zhou Guo, Xu Chao, Wang Xiaohao, Feng Pingfa, Zhang Min. Determination of tool tip steady-state temperature in dry turning process based on artificial neural network // *Journal of Manufacturing Processes*. 2022. Vol. 79. P. 600–613. DOI: [10.1016/j.jmapro.2022.05.021](https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.05.021).
12. Шайлеш Р.А. Качество обработки поверхности и эффективность резания в кунжутном масле во время механической обработки: регрессионный анализ // *Frontier Materials & Technologies*. 2024. № 2. С. 101–111. DOI: [10.18323/2782-4039-2024-2-68-9](https://doi.org/10.18323/2782-4039-2024-2-68-9).
13. Li Guo, Lu Wanqiu, Huang Shuchun, Zhang Xingyu, Ding Shuiting. Analysis and prediction of residual stresses based on cutting temperature and cutting force in rough turning of Ti–6Al–4V // *Heliyon*. 2022. Vol. 8. № 11. Article number e11661. DOI: [10.1016/j.heliyon.2022.e11661](https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11661).
14. Hegab H., Salem A., Rahnamayan S., Kishawy H.A. Analysis, modeling, and multi-objective optimization of machining Inconel 718 with nano-additives based minimum quantity coolant // *Applied Soft Computing*. 2021. Vol. 108. Article number 107416. DOI: [10.1016/j.asoc.2021.107416](https://doi.org/10.1016/j.asoc.2021.107416).
15. Mhlanga D. Artificial Intelligence and Machine Learning for Energy Consumption and Production in Emerging Markets: A Review // *Energies*. 2023. Vol. 16. № 2. Article number 745. DOI: [10.3390/en16020745](https://doi.org/10.3390/en16020745).
16. Cai Wei, Li Yanqi, Li Li, Lai Kee-hung, Jia Shun, Xie Jun, Zhang Yuanhui, Hu Luoke. Energy saving and high efficiency production oriented forward-and-reverse multidirectional turning: Energy modeling and application // *Energy*. 2022. Vol. 252. Article number 123981. DOI: [10.1016/j.energy.2022.123981](https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123981).
17. Li Kuan-Ming, Liang Steven Y. Modelling of cutting forces in near dry machining under tool wear effect // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2007. Vol. 47. № 7-8. P. 1292–1301. DOI: [10.1016/j.ijmachtools.2006.08.017](https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2006.08.017).
18. Ko Jeong Hoon. Time-domain prediction of milling stability according to cross edge radius and flank edge profiles // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2015. Vol. 89. P. 74–85. DOI: [10.1016/j.ijmachtools.2014.11.004](https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2014.11.004).
19. Trujillo Vilches F.J., Hurtado L.S., Fernández F.M., Gamboa C.B. Analysis of the Chip Geometry in Dry Machining of Aeronautical Aluminum Alloys // *Applied Sciences*. 2017. Vol. 7. № 2. Article number 132. DOI: [10.3390/app7020132](https://doi.org/10.3390/app7020132).
20. Machado A.R., Da Silva L.R.R., De Souza F.C.R., Davis R., Pereira L.C., Sales W.F., De Rossi W., Ezugwu E.O. State of the art of tool texturing in machining // *Journal of Materials Processing Technology*. 2021. Vol. 293. Article number 117096. DOI: [10.1016/j.jmatprotec.2021.117096](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2021.117096).
21. Radhika A., Shailesh Rao A., Yogesh K.B. Evaluating machining performance of AISI 1014 steel using gingelly oil as cutting fluid // *Australian Journal of Mechanical Engineering*. 2021. Vol. 19. № 4. P. 445–456. DOI: [10.1080/14484846.2019.1636517](https://doi.org/10.1080/14484846.2019.1636517).
22. Agari S.R. Wear and surface characteristics on tool performance with CVD coating of Al₂O₃/TiCN inserts during machining of Inconel 718 alloys // *Archive of Mechanical Engineering*. 2021. Vol. 69. № 1. P. 59–75. DOI: [10.24425/ame.2021.139647](https://doi.org/10.24425/ame.2021.139647).
23. Demirpolat H., Binali R., Patange A.D., Pardeshi S.S., Gnanasekaran S. Comparison of Tool Wear, Surface Roughness, Cutting Forces, Tool Tip Temperature, and Chip Shape during Sustainable Turning of Bearing Steel // *Materials*. 2023. Vol. 16. № 12. Article number 4408. DOI: [10.3390/ma16124408](https://doi.org/10.3390/ma16124408).
24. Martins P.S., Carneiro J.R.G., Ba E.C.T., Vieira V.F. Study on roughness and form errors linked with tool wear in the drilling process of an Al–Si alloy under high cutting speed using coated diamond-like carbon high-speed steel drill bits // *Journal of Manufacturing Processes*. 2021. Vol. 62. P. 711–719. DOI: [10.1016/j.jmapro.2021.01.006](https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.01.006).
25. Zhuang Gullin, Liu Hanzhong, Zong Wenjun. Research on the Method of Reducing Dynamic Cutting Force in Aspheric Machining // *Micromachines*. 2023. Vol. 14. № 5. Article number 960. DOI: [10.3390/mi14050960](https://doi.org/10.3390/mi14050960).
26. Ellersiek L., Menze C., Sauer F., Denkena B., Möhring H.-Ch., Schulze V. Evaluation of methods for measuring tool-chip contact length in wet machining using different approaches (microtextured tool, in-situ visualization and restricted contact tool) // *Production Engineering*. 2022. Vol. 16. № 5. P. 635–646. DOI: [10.1007/s11740-022-01127-w](https://doi.org/10.1007/s11740-022-01127-w).
27. Vukelic D., Simunovic K., Ivanov V., Sokac M., Kocovic V., Santosi V., Santosi Z., Simunovic G. Modelling of Flank and Crater Wear during Dry Turning of AISI 316L Stainless Steel as a Function of Tool Geometry Using the Response Surface Design // *Tehnicki Vjesnik – Technical Gazette*. 2024. Vol. 31. № 4. P. 1376–1384. DOI: [10.17559/tv-20231226001235](https://doi.org/10.17559/tv-20231226001235).
28. Younas M., Khan M., Jaffery S.H.I., Khan Z., Khan N. Investigation of tool wear and energy consumption in machining Ti6Al4V alloy with uncoated tools // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2024. Vol. 132. № 7-8. P. 3785–3799. DOI: [10.1007/s00170-024-13548-1](https://doi.org/10.1007/s00170-024-13548-1).
29. Çiftçi I. Machining of austenitic stainless steels using CVD multi-layer coated cemented carbide tools // *Tribology International*. 2006. Vol. 39. № 6. P. 565–569. DOI: [10.1016/j.triboint.2005.05.005](https://doi.org/10.1016/j.triboint.2005.05.005).
30. Gokkaya H., Taşkesen A. The effects of cutting speed and feed rate on BUE-BUL formation, cutting forces and surface roughness when machining AA6351 (T6) alloy // *Journal of Mechanical Engineering*. 2008. Vol. 54. № 7-8. P. 521–530.

REFERENCES

1. Anand A., Behera A.K., Das S.R. An overview on economic machining of hardened steels by hard turning and its process variables. *Manufacturing Review*, 2019, vol. 6, pp. 1–9. DOI: [10.1051/mfreview/2019002](https://doi.org/10.1051/mfreview/2019002).
2. Duc Pham Minh, Giang Le Hieu, Dai Mai Duc, Sy Do Tien. An experimental study on the effect of tool geometry on tool wear and surface roughness in hard turning. *Ad-*

- vances in *Mechanical Engineering*, 2020, vol. 12, no. 9, pp. 1–11. DOI: [10.1177/1687814020959885](https://doi.org/10.1177/1687814020959885).
3. Rao A.S. Effect of nose radius on the chip morphology, cutting force and tool wear during dry turning of Inconel 718. *Tribology – Materials Surfaces & Interfaces*, 2023, vol. 17, no. 1, pp. 62–71. DOI: [10.1080/17515831.2022.2160161](https://doi.org/10.1080/17515831.2022.2160161).
 4. Bellini C., Di Cocco V., Iacoviello F., Sorrentino L. Numerical model development to predict the process-induced residual stresses in fibre metal laminates. *Forces in Mechanics*, 2021, vol. 3, article number 100017. DOI: [10.1016/j.finmec.2021.100017](https://doi.org/10.1016/j.finmec.2021.100017).
 5. Mathivanan A., Swaminathan G., Sivaprakasam P., Suthan R., Jayaseelan V., Nagaraj M. DEFORM 3D Simulations and Taguchi Analysis in Dry Turning of 35CND16 Steel. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2022, vol. 2022, no. 1, pp. 1–10. DOI: [10.1155/2022/7765343](https://doi.org/10.1155/2022/7765343).
 6. Mathivanan A., Sudeshkumar M., Ramadoss R., Ezilarasan C., Raju G., Jayaseelan V. Finite element simulation and regression modelling of machining attributes on turning AISI 304 stainless steel. *Manufacturing Review*, 2021, vol. 8, article number 24. DOI: [10.1051/mfreview/2021022](https://doi.org/10.1051/mfreview/2021022).
 7. Li Bin. A review of tool wear estimation using theoretical analysis and numerical simulation technologies. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2012, vol. 35, pp. 143–151. DOI: [10.1016/j.ijrmhm.2012.05.006](https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2012.05.006).
 8. Outeiro J.K., Umbrello D., M'Saoubi R., Jawahir I.S. Evaluation of Present Numerical models for Predicting Metal Cutting Performance and Residual Stresses. *Machining Science and Technology*, 2015, vol. 19, no. 2, pp. 183–216. DOI: [10.1080/10910344.2015.1018537](https://doi.org/10.1080/10910344.2015.1018537).
 9. Zheng Jin, Zhang Yaoman, Qiao Hanying. Milling Mechanism and Chattering Stability of Nickel-Based Superalloy Inconel 718. *Materials*, 2023, vol. 16, article number 5748. DOI: [10.3390/ma16175748](https://doi.org/10.3390/ma16175748).
 10. Xiang Huimin, Xing Yan, Dai Fu-zhi et al. High-entropy ceramics: Present status, challenges, and a look forward. *Journal of Advanced Ceramics*, 2021, vol. 10, no. 3, pp. 385–441. DOI: [10.1007/s40145-021-0477-y](https://doi.org/10.1007/s40145-021-0477-y).
 11. Zhou Guo, Xu Chao, Wang Xiaohao, Feng Pingfa, Zhang Min. Determination of tool tip steady-state temperature in dry turning process based on artificial neural network. *Journal of Manufacturing Processes*, 2022, vol. 79, pp. 600–613. DOI: [10.1016/j.jmapro.2022.05.021](https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.05.021).
 12. Shailesh R.A. Surface finish and cutting efficiency in gingelly oil during machining: regression analysis. *Frontier Materials & Technologies*, 2024, no. 2, pp. 101–111. DOI: [10.18323/2782-4039-2024-2-68-9](https://doi.org/10.18323/2782-4039-2024-2-68-9).
 13. Li Guo, Lu Wanqiu, Huang Shuchun, Zhang Xingyu, Ding Shuiting. Analysis and prediction of residual stresses based on cutting temperature and cutting force in rough turning of Ti–6Al–4V. *Heliyon*, 2022, vol. 8, no. 11, article number e11661. DOI: [10.1016/j.heliyon.2022.e11661](https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11661).
 14. Hegab H., Salem A., Rahnamayan S., Kishawy H.A. Analysis, modelling, and multi-objective optimisation of machining Inconel 718 with nano-additives based minimum quantity coolant. *Applied Soft Computing*, 2021, vol. 108, article number 107416. DOI: [10.1016/j.asoc.2021.107416](https://doi.org/10.1016/j.asoc.2021.107416).
 15. Mhlanga D. Artificial Intelligence and Machine Learning for Energy Consumption and Production in Emerging Markets: A Review. *Energies*, 2023, vol. 16, no. 2, article number 745. DOI: [10.3390/en16020745](https://doi.org/10.3390/en16020745).
 16. Cai Wei, Li Yanqi, Li Li, Lai Kee-hung, Jia Shun, Xie Jun, Zhang Yuanhui, Hu Luo. Energy saving and high efficiency production oriented forward-and-reverse multidirectional turning: Energy modelling and application. *Energy*, 2022, vol. 252, article number 123981. DOI: [10.1016/j.energy.2022.123981](https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123981).
 17. Li Kuan-Ming, Liang Steven Y. Modelling of cutting forces in near dry machining under tool wear effect. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2007, vol. 47, no. 7-8, pp. 1292–1301. DOI: [10.1016/j.ijmachtools.2006.08.017](https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2006.08.017).
 18. Ko Jeong Hoon. Time-domain prediction of milling stability according to cross edge radius and flank edge profiles. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2015, vol. 89, pp. 74–85. DOI: [10.1016/j.ijmachtools.2014.11.004](https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2014.11.004).
 19. Trujillo Vilches F.J., Hurtado L.S., Fernández F.M., Gamboa C.B. Analysis of the Chip Geometry in Dry Machining of Aeronautical Aluminium Alloys. *Applied Sciences*, 2017, vol. 7, no. 2, article number 132. DOI: [10.3390/app7020132](https://doi.org/10.3390/app7020132).
 20. Machado A.R., Da Silva L.R.R., De Souza F.C.R., Davis R., Pereira L.C., Sales W.F., De Rossi W., Ezugwu E.O. State of the art of tool texturing in machining. *Journal of Materials Processing Technology*, 2021, vol. 293, article number 117096. DOI: [10.1016/j.jmatprotec.2021.117096](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2021.117096).
 21. Radhika A., Shailesh Rao A., Yogesh K.B. Evaluating machining performance of AISI 1014 steel using gingelly oil as cutting fluid. *Australian Journal of Mechanical Engineering*, 2021, vol. 19, no. 4, pp. 445–456. DOI: [10.1080/14484846.2019.1636517](https://doi.org/10.1080/14484846.2019.1636517).
 22. Agari S.R. Wear and surface characteristics on tool performance with CVD coating of Al₂O₃/TiCN inserts during machining of Inconel 718 alloys. *Archive of Mechanical Engineering*, 2021, vol. 69, no. 1, pp. 59–75. DOI: [10.24425/ame.2021.139647](https://doi.org/10.24425/ame.2021.139647).
 23. Demirpolat H., Binali R., Patange A.D., Pardeshi S.S., Gnanasekaran S. Comparison of Tool Wear, Surface Roughness, Cutting Forces, Tool Tip Temperature, and Chip Shape during Sustainable Turning of Bearing Steel. *Materials*, 2023, vol. 16, no. 12, article number 4408. DOI: [10.3390/ma16124408](https://doi.org/10.3390/ma16124408).
 24. Martins P.S., Carneiro J.R.G., Ba E.C.T., Vieira V.F. Study on roughness and form errors linked with tool wear in the drilling process of an Al–Si alloy under high cutting speed using coated diamond-like carbon high-speed steel drill bits. *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, vol. 62, pp. 711–719. DOI: [10.1016/j.jmapro.2021.01.006](https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.01.006).
 25. Zhuang Gullin, Liu Hanzhong, Zong Wenjun. Research on the Method of Reducing Dynamic Cutting Force in Aspheric Machining. *Micromachines*, 2023, vol. 14, no. 5, article number 960. DOI: [10.3390/mi14050960](https://doi.org/10.3390/mi14050960).
 26. Ellersiek L., Menze C., Sauer F., Denkena B., Möhring H.-Ch., Schulze V. Evaluation of methods for measuring tool-chip contact length in wet machining using different approaches (microtextured tool, in-situ visualisation and restricted contact tool). *Production*

- Engineering*, 2022, vol. 16, no. 5, pp. 635–646. DOI: [10.1007/s11740-022-01127-w](https://doi.org/10.1007/s11740-022-01127-w).
27. Vukelic D., Simunovic K., Ivanov V., Sokac M., Kocovic V., Santosi V., Santosi Z., Simunovic G. Modelling of Flank and Crater Wear during Dry Turning of AISI 316L Stainless Steel as a Function of Tool Geometry Using the Response Surface Design. *Tehnicki Vjesnik – Technical Gazette*, 2024, vol. 31, no. 4, pp. 1376–1384. DOI: [10.17559/tv-20231226001235](https://doi.org/10.17559/tv-20231226001235).
28. Younas M., Khan M., Jaffery S.H.I., Khan Z., Khan N. Investigation of tool wear and energy consumption in machining Ti6Al4V alloy with uncoated tools. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2024, vol. 132, no. 7-8, pp. 3785–3799. DOI: [10.1007/s00170-024-13548-1](https://doi.org/10.1007/s00170-024-13548-1).
29. Çiftçi I. Machining of austenitic stainless steels using CVD multi-layer coated cemented carbide tools. *Tribology International*, 2006, vol. 39, no. 6, pp. 565–569. DOI: [10.1016/j.triboint.2005.05.005](https://doi.org/10.1016/j.triboint.2005.05.005).
30. Gokkaya H., Taşkesen A. The effects of cutting speed and feed rate on BUE-BUL formation, cutting forces and surface roughness when machining AA6351 (T6) alloy. *Journal of Mechanical Engineering*, 2008, vol. 54, no. 7-8, pp. 521–530.

Effect of alloy composition on machining parameters and surface quality through comprehensive analysis

Shailesh Rao A.*¹, PhD, Professor, Department of Mechanical Engineering

Srilatha Rao², PhD, Professor

Nitte Meenakshi Institute of Technology, Bangalore (India)

*E-mail: shailesh.rao@nmit.ac.in

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6190-9857>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3691-8713>

Received 25.04.2024

Revised 18.06.2024

Accepted 05.11.2024

Abstract: This study examined the influence of alloy composition (mild steel and aluminium) on several machining parameters, such as temperature, cutting force, surface roughness, and chip morphology. Significant variations in these parameters were detected by modifying the alloys while maintaining constant process conditions. In mild steel, rotating speed affected chip morphology, with elevated speeds resulting in continuous chips and reduced rates yielding shorter chips. The augmented rake angle affects the chip properties, resulting in a little decrease in chip length. Moreover, the cutting force influenced the chip length at a designated rotational speed. Conversely, aluminium alloys continuously generated continuous chip fragments irrespective of cutting speed or rake angle. Favourable correlation coefficients are noted among the variables, and a regression model is effectively developed and utilised on the experimental data. The random forest model, indicates that material selection significantly influences temperature, cutting force, surface roughness, and chip morphology during machining. This study offers significant insights into the correlation between tool rake angle and other machining parameters, elucidating the elements that influence surface quality. The results enhance comprehension of machined surface attributes, facilitating the optimisation of machining operations for various materials.

Keywords: turning process; rake angle; chip morphology; predictive modelling.

For citation: Shailesh Rao A., Rao S. Effect of alloy composition on machining parameters and surface quality through comprehensive analysis. *Frontier Materials & Technologies*, 2024, no. 4, pp. 97–110. DOI: 10.18323/2782-4039-2024-4-70-9.